DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251029003
引用格式: 张超, 丁敏, 李瑞菊, 等. 酸枣叶茶中 15 种元素含量分析及重金属健康风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 28–36.
ZHANG C, DING M, LI RJ, *et al*. Analysis of 15 kinds of element content and health risk assessment of heavy metals in *Ziziphus jujuba* leaf tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 28–36. (in Chinese with English abstract).

酸枣叶茶中 15 种元素含量分析及重金属健康风险评价

张 超[1], 丁 敏[1], 李瑞菊[1], 李 霞[1], 李增梅[1], 赵 彤[1], 王玉涛[1], 王峰恩[1*], 胡大刚[2*]

(1. 山东省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 济南 250100;
2. 山东农业大学园艺科学与工程学院, 泰安 271018)

摘 要: 目的 探究酸枣叶茶中多种元素含量并评估其营养特征和重金属污染风险。**方法** 市售 7 个主产区的酸枣叶茶样品经微波消解前处理后, 采用等离子体原子发射光谱法(inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry, ICP-AES)、电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)和原子荧光光谱法(atomic fluorescence spectrometry, AFS)测定酸枣叶茶中 K、Ca、Fe、Na、Mn、Sr、Zn、Cu、Cr、Ni、Pb、As、Se、Cd、Hg 等 15 种元素的含量, 并运用单因子污染指数法、内梅罗综合多因子指数法及目标危害系数法对酸枣叶茶中 6 种重金属(Cu、Cr、Pb、As、Cd、Hg)进行污染评价和健康风险评估。**结果** 酸枣叶茶中所测 15 种元素平均含量顺序为 K>Ca>Fe>Na>Mn>Sr>Zn>Cu>Cr>Ni>Pb>As>Se>Cd>Hg, 其中 K、Ca、Fe 含量较高, 三者总量占所测元素总量的 97.9%, 同时不同产区样品中元素含量普遍具有区域差异性(P<0.05)。6 种重金属含量均未超过 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》规定限值, 单因子污染指数均小于 0.6, 内梅罗综合污染指数均小于 0.7, 目标危害系数和总危险系数均小于 1。**结论** 在本研究评估模型下, 市售酸枣叶茶中重金属污染水平较低, 对人体的健康风险在可接受范围内。

关键词: 酸枣叶茶; 重金属; 相关性分析; 健康风险评价

收稿日期: 2025-10-29
基金项目: 山东省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所青年成长基金项目(2023CZ01); 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2023CXGC010717)
第一作者: 张超(1992—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全和营养品质研究。E-mail: ytzc1212@163.com
***通信作者:** 王峰恩(1983—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全与品质评价研究。E-mail: wfe8520382@163.com
胡大刚(1986—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为果实品质生物学与营养健康研究。E-mail: fap_296566@163.com

Analysis of 15 kinds of element content and health risk assessment of heavy metals in *Ziziphus jujuba* leaf tea

ZHANG Chao[1], DING Min[1], LI Rui-Ju[1], LI Xia[1], LI Zeng-Mei[1], ZHAO Tong[1], WANG Yu-Tao[1], WANG Feng-En[1*], HU Da-Gang[2*]

(1. *Institute of Quality Standards and Testing Technology for Agro-products*, *Shandong Academy of Agricultural Sciences*, *Ji'nan* 250100, *China*; 2. *College of Horticultural Science and Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Tai'an* 271018, *China*)

ABSTRACT: Objective　To explore the content of multiple elements in *Ziziphus jujuba* leaf tea and evaluate its nutritional characteristics and heavy metal contamination risk. **Methods**　Commercially available *Ziziphus jujuba* leaf tea samples from 7 major production areas were subjected to microwave digestion pretreatment. The content of 15 kinds of elements (K, Ca, Fe, Na, Mn, Sr, Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, As, Se, Cd, Hg) were determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES), inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and atomic fluorescence spectrometry (AFS). Pollution assessment and health risk evaluation for 6 kinds of heavy metals (Cu, Cr, Pb, As, Cd, Hg) were conducted using the single factor pollution index method, the Nemerow multi-factor composite index method and the target hazard quotient method. **Results**　The average content order of the 15 kinds of elements in *Ziziphus jujuba* leaf tea was K>Ca>Fe>Na>Mn>Sr>Zn>Cu>Cr>Ni>Pb>As>Se>Cd>Hg. The content of K, Ca and Fe were relatively high, respectively, with these 3 kinds of elements accounting for 97.9% of the total measured element content. Furthermore, the element content in samples from different production areas generally showed regional differences (P<0.05). The content of the 6 kinds of heavy metals did not exceed the limits specified in GB 2762—2022 *National food safety standard-Maximum levels of pollutants in foods*. The single factor pollution indexes were all below 0.6, the Nemerow comprehensive pollution indexes were all below 0.7, and the target hazard quotients and total hazard index were all less than 1. **Conclusion**　Under the evaluation model of this study, the heavy metal pollution level in commercially available *Ziziphus jujuba* leaf tea is low, and the associated health risks to humans are within an acceptable range.

KEY WORDS: *Ziziphus jujuba* leaf tea; heavy metals; correlation analysis; health risk assessment

0　引　言

随着健康消费理念的普及, 代用茶因其原料多样性和功能特异性逐渐成为传统茶饮的重要替代选择。酸枣叶代用茶作为代表之一, 逐渐进入消费者视野, 其内含活性成分(黄酮类、皂苷类、氨基酸、维生素)[1]已被证实具有多重生物活性, 包括调节睡眠[2–5]、清除自由基[6]、肝损伤修复[7]、抑制病原微生物[8]及改善心血管功能[9]等。近年来, 对酸枣叶茶制茶原料分析与改良[10–11]、制茶工艺改进[12–13]等研究增多, 产业正逐步由传统加工向标准化、高值化方向发展。传统茶叶中已被证实富含多种矿质元素, 对人体正常生命活动具有重要的作用[14], 且前人研究指出红茶[15]、绿茶[16]、白茶[17]、武夷岩茶[18]中矿质元素含量普遍因产区不同而有所差异。随着环境污染, Cd、As、Hg 等重金属污染对茶叶质量安全带来的风险引起广泛关注[19–20], 目前绿茶[21]、红茶[15]等重金属风险评估研究中结果多为长期饮用不存在健康风险, 而在贵州市 2016—2021 年间市售食品 Pb 污染状况调查中, 苦丁茶处于轻度污染状态[22], 提示对于茶叶的重金属风险仍需警惕, 要进行持续的健康风险控制。然而, 酸枣叶作为新兴代用茶, 对于其元素种类研究较少且多针对单一产地, 缺乏全面系统的元素组成分析与重金属风险评估研究。

鉴于此, 本研究选取我国北方陕西、河北、山东等[23]7 个主产区的酸枣叶茶作为样品, 同时扩大矿质元素范围, 测定其中包括人体必需元素和常见重金属污染物: K、Ca、Fe、Na、Mn、Sr、Zn、Cu、Cr、Ni、Pb、As、Se、Cd、Hg 等传统茶叶中常见 15 种元素的含量, 了解区域分布特征, 并进行元素相关性分析。同时, 针对 Cu、Cr、Pb、As、Cd、Hg 这 6 种潜在风险元素, 运用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法及目标危害系数法进行了健康风险评估。旨在建立酸枣叶茶的多元素数据库, 并评估其营养特征和重金属污染风险, 为该资源的深度研究与综合开发利

用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

检测样品为市售来自陕西秦岭、河北邢台、山东泰安、陕西吕梁、山东沂蒙山、山东日照及山东崂山共 7 个主产区的酸枣叶茶, 样品信息以其市售包装标识为准, 每产区 3 份茶样。

硝酸(优级纯, 江苏晶瑞有限公司); 茶叶成分分析标准物质[GBW10052a (GSB-30a, 绿茶, 35 g)、GBW10016a (GSB-7a, 茶叶, 30 g)](地球物理地球化学勘查研究所); 单元素标准溶液[GSB04-1751-2004 (Se)、GSB04-1729-2004 (K)、GSB04-1733-2004 (Hg)](质量浓度 1000 μg/mL), 多元素混合标准溶液[GNM-M071295-2013 (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, 质量浓度 100 μg/mL)、GNM-M112184-2013 (Ba, Ca, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Sr, Zn, 质量浓度 1000 μg/mL)、GNM-M061667-2013 (Ge, Rh, Bi, In, Sc, 质量浓度 1000 μg/mL)](国家有色金属及电子材料分析测试中心)。

1.2 仪器与设备

BSA224S-CW 分析天平(精度 0.01 mg, 德国 Sartorius 公司); MASTER 40 高通量微波消解工作站(上海新仪微波化学科技有限公司); iCAP Q 电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); Avio 200 电感耦合等离子体发射光谱仪[铂金埃尔默(苏州)有限公司]; HGF-V2 原子荧光光谱仪(北京海光仪器有限公司); TK20 石墨消解仪(上海新仪微波化学科技有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品预处理

每份样品充分混匀后, 按四分法分取 10 g 试样。将试样置于 55 ℃烘箱中干燥至恒重, 经高速粉碎机粉碎后, 过 150 μm 孔径尼龙筛, 所得粉末供元素含量测定。所有样品均设置 3 次技术重复。

1.3.2 标准溶液的配制

标准工作曲线配制: 用 5%硝酸溶液将上述多元素标准溶液逐级稀释, 配制成质量浓度为 100 μg/L 的标准储备液。随后, 将储备液进一步梯度稀释, 获得质量浓度依次为 0.00、0.20、0.50、1.00、2.00、5.00 及 10.00 μg/L 的标准工作液系列。

内标溶液配制: 将 GNM-M061667-2013 内标元素标准溶液用 5%硝酸稀释至 10 μg/L, 作为内标工作液。

1.3.3 样品消解

样品前处理: 准确称取 0.2 g(精确至 0.0001 g)样品于聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)消解管中, 同时设置样品空白组。加入 8.0 mL 硝酸, 静置过夜。随后, 将消解管置于 80 ℃的石墨消解仪中预消解 1 h。预消解完成且冷却至室温后, 执行如下微波消解程序: 6 min 升温至 120 ℃并保持 5 min; 5 min 升温至 160 ℃并保持 5 min; 5 min 升温至 180 ℃并保持 25 min。消解程序结束后冷却, 将消解液定量转移至 25.00 mL 容量瓶, 用一级水定容至刻度, 待测[24]。

1.3.4 仪器条件与参数设置

等离子体原子发射光谱仪(inductively coupled plasma-atomic emission spectrometer, ICP-AES): 射频功率 1.3 kw; 等离子体气流量 10 L/min, 辅助气流量 0.2 L/min, 雾化气流量 0.7 L/min, 雾化压力 200 kPa; 观测高度 15 mm; 蠕动泵流动速率 1.5 mL/min, 光源稳定延迟 15 s。

电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS): 射频功率 1550 W; 等离子体气 14.0 L/min, 辅助气 0.8 L/min, 载气 1.08 L/min, 采样深度 5 mm, 采用 He 碰撞模式, 结合在线内标法进行外标定量。

原子荧光光谱仪: 负高压 260 V, 空心阴极灯电流 30 mA, 载气 300 mL/min, 辅助气 100 mL/min。

1.3.5 污染评价

(1)酸枣叶茶中重金属污染评价

采用单因子污染指数法[公式(1)]和内梅罗综合指数法[公式(2)][26]评估酸枣叶代用茶中重金属污染风险。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中: P_i 为重金属 i 的单项污染指数; C_i 为该重金元素 i 的实测浓度, mg/kg; S_i 为重金属 i 的限量标准, mg/kg。限量依据如下: Pb 执行 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》茶叶类标准(5.0 mg/kg); Cr、Cd、Hg、As 参考 NY 659—2003《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》(Cr 5.0 mg/kg, Cd 1 mg/kg, Hg 0.3 mg/kg, As 2 mg/kg)(该标准已废止, 但因 GB 2762—2022 未规定上述元素茶叶限量, 本研究暂将其作为参考性限量); Cu 参照 NY/T 288—2018《绿色食品 茶叶》标准(30 mg/kg)。

$$P_{综}=\sqrt{\frac{P^2_{max}+P^2_{ave}}{2}} \tag{2}$$

式中: $P_{综}$为内梅罗综合污染指数; P_{max} 为酸枣叶茶中重金属最大单项污染指数; P_{ave} 为酸枣叶中各元素单项污染指数平均值。酸枣叶代用茶污染等级划分参照茶叶标准(表 1)[25]。

(2)酸枣叶茶中重金属健康风险评估

采用目标危害系数法评估酸枣叶代用茶中 Cr、Cd、Ni、Pb、Cu、As 6 种重金属的健康风险。目标危害商数(target hazard quotient, THQ)表征单一元素风险[计算如公式(3)], 总目标危害商数(total target hazard quotient, TTHQ)。

表 1　茶叶中单因子污染指数及内梅罗综合污染指数分级及评价标准[25]

Table 1　Classification and evaluation standards for single-factor pollution index and Nemero comprehensive pollution index in tea[25]

单因子污染指数(P_i)	污染等级	内梅罗综合污染指数($P_{综}$)	综合污染水平
<0.6	无污染	≤0.7	无污染清洁安全
0.6~1.0	轻度污染~中度污染	0.7~1.0	尚安全(警戒线)
>1.0	重度污染	>1.0	轻度污染~重度污染

表征综合暴露风险[计算如公式(4)][15,26], 相关参数定义见表 2:

$$THQ=\frac{E_F E_D F_{IR} C}{R_{FD} W_{AB} T_A}\times 10^{-3} \quad (3)$$

$$TTHQ=\sum THQ \quad (4)$$

风险判据: THQ/TTHQ<1 时, 健康风险处于可接受水平; THQ/TTHQ≥1 时, 提示存在潜在健康风险, 可能对人群造成危害, 需进一步调查或启动风险管控。

1.4　数据处理

数据经 Microsoft Excel 2010 软件整理后, 采用 SPSS 20.0 进行显著性分析检验(P<0.05)及变量相关性分析。

2　结果与分析

2.1　酸枣叶茶中 15 种元素含量

21 份酸枣叶茶样品(覆盖 7 个主产区)中 15 种元素含量测定结果(表 3)显示: 元素总量分布序列为 K>Ca>Fe>Na>Mn>Sr>Zn>Cu>Cr>Ni>Pb>As>Se>Cd>Hg, 其中 K、Ca、Fe 占比达 97.9%; 产区间元素含量具有差异显著(P<0.05), 进一步分析发现, 不同产区元素含量呈现显著地域特征。如山东崂山样品中 Mn 含量最高(56.67 mg/kg), 河北邢台样品 Fe 含量突出(422.91 mg/kg), 而陕西秦岭样品以高 K (20456.61 mg/kg)和 Sr (115.27 mg/kg)为特征。这些差异可能与产地土壤母质及气候条件密切相关, 印证了不同产地种植作物中元素含量的普遍差异性, 也为酸枣叶茶的产地溯源提供了潜在指标[22]。6 种重金属检测值均低于国标限值: Pb (0.461~1.335 mg/kg)<5.0、Cr (1.07~3.27 mg/kg)<5.0、Cd (0.0135~0.0453 mg/kg)<1.0、As (0.0799~0.1724 mg/kg)<2.0、Hg (0.00306~0.00466 mg/kg)<0.3、Cu (5.37~9.82 mg/kg)<30.0(依据 GB 2762—2022、NY/T 288—2018《绿色食品 茶叶》, 参考 NY 659—2003), 表明样品安全性符合要求。

2.2　酸枣叶茶中 15 种元素含量间的相关性

元素的相关性分析对污染溯源与风险评估具重要价值[30]。表 4 中酸枣叶茶元素相关性分析结果显示: Mn 与 Na 呈极显著正相关(P<0.01); Sr 与 Ca 显著负相关(P<0.05)且与 Fe 极显著负相关(P<0.01); Zn 与 Na 显著正相关(P<0.05), 与 Fe、Mn 极显著正相关(P<0.01), 而与 Sr 极显著负相关(P<0.01); Cu 与 Fe 显著正相关(P<0.05), 与 Ca 极显著负相关(P<0.01), 且与 Zn 极显著正相关(P<0.01); Cr 与 Fe、Na、Mn、Zn 极显著正相关(P<0.01)而与 Sr 极显著负相关(P<0.01); Pb 与 Fe、Zn、Cr 极显著正相关(P<0.01), 与 Sr 极显著负相关(P<0.01)且与 Cu 显著正相关(P<0.05); As 与 Fe、Mn、Zn、Cr、Pb 极显著正相关(P<0.01)且与 Na 显著正相关(P<0.05); Se 与 Fe、Mn、Zn、Cr、Pb、As 极显著正相关(P<0.01), 与 Sr 显著负相关(P<0.05)且与 Cu 显著正相关(P<0.05); Cd 与 Ca 极显著负相关(P<0.01), 与 Mn 极显著正相关(P<0.01)且与 Sr、As 显著正相关(P<0.05); Hg 与 Ca 极显著正相关(P<0.01), 与 Ni 显著负相关(P<0.05)且与 Cd 极显著负相关(P<0.01)。该规律与张明露等[15]研究贵州红茶中元素相关性研究中 As 与 Fe、Cr、Pb 具有较强协同作用, Mn 与 Se、Cd、Pb 具有较强协同作用一致, 与宋勤飞等[31]在普安红茶元素相关性研究中 As 与 Pb、Cu 具有正相关关系一致。多元素的相关性提示元素互作受地质背景与植物生理共同调控, 可能反映土壤重金属共生特性[32−33], 或与金属转运蛋白有多元素结合位点, 具有底物广谱性有关[34], 同时多元素正相关关系提示具有复合污染的可能性。

表 2　目标危害系数评价法参数

Table 2　Parameters of target hazard coefficient evaluation method

参数	含义	单位	数值
E_F	暴露频率	d/a	365
E_D	暴露持续时间	a	77.3[27](中国人口平均寿命)
F_{IR}	茶叶日均摄入量	g/d	6[15](每人每日饮用茶叶 6 g)
C	重金属含量	mg/kg	试验测定结果
R_{FD}	重金属摄入参考剂量	mg/(kg・d)	Cu、Cr、Pb、As、Cd 和 Hg 分别为 0.04、0.003、0.004、0.0003、0.001、0.00057[28−29]
W_{AB}	成人体重	kg	70[15]
T_A	非致癌物的平均暴露时间	d	T_A=365×E_D

表 3 酸枣叶茶样品中 15 种元素含量(mg/kg)

Table 3 Content of 15 kinds of elements in *Ziziphus jujuba* leaf tea samples (mg/kg)

元素	陕西秦岭	河北邢台	山东泰山	山西吕梁	山东沂蒙山	山东日照	山东崂山	最小值	最大值	平均值
K	20456.61±26.29^{a}	18146.39±94.63^{c}	20352±94.63^{a}	15791.50±150.36^{e}	18941.73±37.44^{b}	18142.44±141.71^{c}	16474.29±154.92^{d}	15660.51	20486.88	18329.28±1688.06
Ca	7627.38±53.81^{d}	9344.75±3.64^{c}	10484.4±97.71^{b}	10498.18±193.18^{b}	11571.51±97.71^{a}	7730.67±78.55^{d}	9499.15±12.59^{c}	7565.25	11682.75	9536.58±1393.52
Fe	129.20±0.95^{g}	422.91±1.34^{a}	293.02±1.62^{c}	170.81±1.21^{e}	285.02±1.62^{d}	359.98±2.89^{b}	155.98±0.94^{f}	128.25	424.97	259.56±105.46
Na	188.32±1.11^{d}	219.56±0.19^{c}	260.99±3.17^{a}	171.13±3.81^{e}	225.22±3.17^{b}	225.56±1.4^{b}	261.36±2.2^{a}	168.18	263.63	221.74±32.04
Mn	25.05±0.33^{e}	36.20±0.63^{d}	38.24±0.19^{c}	24.95±0.52^{e}	35.83±0.19^{d}	41.32±0.29^{b}	56.67±0.83^{a}	24.39	57.49	36.90±10.23
Sr	115.27±2.17^{a}	13.89±0.19^{d}	12.75±0.04^{de}	37.31±1.18^{c}	10.82±0.12^{f}	12.02±0.24^{ef}	50.63±0.35^{b}	10.69	117.45	36.12±36.2
Zn	26.30±0.19^{f}	38.39±0.91^{b}	33.53±0.24^{c}	21.59±0.06^{g}	31.01±0.24^{d}	42.64±0.10^{a}	27.15±0.11^{e}	21.52	42.75	31.52±6.94
Cu	8.22±0.01^{b}	9.74±0.07^{a}	7.33±0.16^{d}	5.40±0.03^{a}	7.66±0.16^{c}	8.30±0.02^{b}	7.31±0.12^{d}	5.37	9.82	7.71±1.25
Cr	1.08±0.01^{f}	1.68±0.14^{d}	2.78±0.09^{b}	1.19±0.03^{f}	2.14±0.10^{c}	2.88±0.03^{a}	1.32±0.01^{e}	1.07	3.27	1.96±0.85
Ni	0.704±0.019^{e}	1.113±0.052^{d}	1.498±0.047^{c}	1.240±0.094^{d}	1.380±0.047^{c}	1.735±0.136^{b}	2.621±0.089^{a}	0.688	2.716	1.470±0.574
Pb	0.468±0.007^{f}	0.986±0.007^{b}	0.651±0.022^{d}	0.564±0.016^{e}	0.684±0.022^{c}	1.313±0.021^{a}	0.549±0.016^{e}	0.461	1.335	0.745±0.285
As	0.0810±0.0017^{f}	0.1718±0.0035^{a}	0.0995±0.0002^{d}	0.0895±0.0018^{e}	0.0959±0.0002^{d}	0.1410±0.0032^{b}	0.1130±0.0032^{c}	0.0799	0.1724	0.1131±0.0308
Se	0.0449±0.0016^{e}	0.1568±0.0063^{a}	0.0957±0.0067^{c}	0.0645±0.0024^{d}	0.0978±0.0067^{bc}	0.1469±0.0072^{a}	0.1065±0.0084^{b}	0.0435	0.1619	0.1019±0.0386
Cd	0.0218±0.0001^{c}	0.0218±0.0006^{c}	0.0158±0.0001^{d}	0.0146±0.0002^{e}	0.0136±0.0001^{f}	0.0255±0.0001^{b}	0.0448±0.0005^{a}	0.0135	0.0453	0.0226±0.0102
Hg	0.00358±0.00011^{c}	0.00458±0.0001^{a}	0.00434±0.00009^{b}	0.00422±0.00004^{b}	0.00457±0.00009^{a}	0.00311±0.00005^{e}	0.00342±0.00015^{d}	0.00306	0.00466	0.00397±0.00057

注: 同行不同字母表示具有显著性差异, P<0.05。

表 4 酸枣叶茶样品中 15 种元素含量间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of content between 15 kinds of elements in *Ziziphus jujuba* leaf tea samples

元素	K	Ca	Fe	Na	Mn	Sr	Zn	Cu	Cr	Ni	Pb	As	Se	Cd	Hg
K	1														
Ca	–0.094	1													
Fe	–0.045	0.052	1												
Na	0.125	0.225	0.145	1											
Mn	–0.178	–0.066	0.297	0.849**	1										
Sr	–0.088	–0.455*	–0.664**	–0.273	–0.233	1									
Zn	0.194	–0.177	0.849**	0.447*	0.554**	–0.618**	1								
Cu	0.338	–0.564**	0.528*	–0.065	0.076	–0.181	0.693**	1							
Cr	0.126	0.175	0.731**	0.569**	0.601**	–0.845**	0.834**	0.258	1						
Ni	–0.347	0.206	0.088	0.763**	0.835**	–0.31	0.301	–0.305	0.548*	1					
Pb	–0.07	0.047	0.905**	0.17	0.331	–0.792**	0.869**	0.546*	0.788**	0.236	1				
As	–0.271	–0.158	0.764**	0.434*	0.661**	–0.353	0.809**	0.503*	0.582**	0.43	0.736**	1			
Se	–0.243	–0.113	0.771**	0.377	0.590**	–0.455*	0.816**	0.541*	0.610**	0.4	0.803**	0.964**	1		
Cd	–0.144	–0.693**	–0.061	0.376	0.630**	0.441*	0.272	0.316	–0.021	0.385	–0.035	0.447*	0.358	1	
Hg	0.2	0.566**	0.343	–0.155	–0.358	–0.316	0.022	0.058	0.04	–0.479*	0.188	0.003	0.051	–0.685**	1

注: *表示相关性显著(P<0.05), **表示相关性极显著(P<0.01)。

2.3　酸枣叶茶中重金属污染评价结果

所有酸枣叶茶样品的 Cr、Cu、Pb、As、Cd、Hg 含量均符合 GB 2762—2022 限量要求, 安全风险可控。单因子污染指数[Cr>Cu>Pb>As>Cd>Hg, 均小于 0.6]与内梅罗综合污染指数(Cr>Cu>Pb>As>Cd>Hg, 均小于 0.7)排序一致(表 5), 参照 NY/T 398—2000《农、畜、水产品污染监测技术规范》标准, 6 种重金属污染水平接近或略高于背景值, 表明酸枣叶茶受到这 6 种重金属污染轻微; 同时值得注意的是, Cr 的单项指数及综合指数贡献率均为最高, 需重点监控其污染状况。

2.4　健康风险评价结果

采用 THQ/TTHQ 评估酸枣叶茶中 Cr、Cu、Pb、As、Cd、Hg 对成人的综合健康风险(表 6)。结果显示: 所有产区 THQ 与 TTHQ 值均小于 1, 表明长期摄入的健康风险较低。Cr在6种重金属中的健康风险贡献率最高(各产区均居首位), 需重点监控其污染来源及动态变化, 保障产业生态安全。

表 5　酸枣叶茶中 Cu、Cr、Pb、As、Cd 和 Hg 6 种元素单因子及综合污染评价结果

Table 5　Evaluation results of single factor and comprehensive pollution of 6 kinds of elements, namely Cu, Cr, Pb, As, Cd and Hg, in *Ziziphus jujuba* leaf tea

元素	实测范围 /(mg/kg)	实测平均值 /(mg/kg)	限量值 /(mg/kg)	P_{ave}	P_{max}	最大单因子污染水平	$P_{综}$	综合污染水平
Cu	5.37~9.82	7.71	30	0.26	0.33	无污染	0.29	无污染
Cr	1.07~2.92	1.96	5	0.39	0.58	无污染	0.54	无污染
Pb	0.461~1.335	0.745	5	0.15	0.27	无污染	0.22	无污染
As	0.0799~0.1724	0.1131	2	0.06	0.09	无污染	0.07	无污染
Cd	0.0135~0.0453	0.0226	1	0.02	0.05	无污染	0.04	无污染
Hg	0.00306~0.00466	0.00397	0.3	0.01	0.02	无污染	0.01	无污染

表 6　酸枣叶茶中重金属对人体健康影响评价

Table 6　Evaluation of the impact of heavy metals in *Ziziphus jujuba* leaf tea on human health

系数类别	元素	陕西秦岭	河北邢台	山东泰山	山西吕梁	山东沂蒙山	山东日照	山东崂山
THQ	Cu	0.0235	0.0278	0.0219	0.0154	0.0219	0.0237	0.0209
	Cr	0.0411	0.0640	0.1059	0.0453	0.0815	0.1097	0.0503
	Pb	0.0134	0.0282	0.0196	0.0161	0.0196	0.0375	0.0157
	As	0.0309	0.0635	0.0365	0.0341	0.0365	0.0537	0.0432
	Cd	0.0025	0.0025	0.0016	0.0017	0.0016	0.0029	0.0051
	Hg	0.0007	0.0009	0.0009	0.0008	0.0009	0.0006	0.0007
TTHQ		0.1121	0.1888	0.1864	0.1135	0.1620	0.2282	0.1358

3　讨　论

酸枣叶代用茶作为传统茶饮的重要功能补充, 凭借独特风味与镇静助眠等功效, 消费需求显著增长。因此开展酸枣叶茶的元素分析、重金属污染评估及健康风险评价, 有助于促进其产业的发展。本研究对 7 大主产区样品进行了15种元素的系统性测定, 证实酸枣芽茶普遍富含K、Ca、Fe等矿质元素; 并对酸枣叶茶进行重金属污染评估及健康风险评价, 本研究市售酸枣叶茶样品中 Cr、Cu、Pb、As、Cd、Hg 等 6 种重金属含量均符合相关限量标准, 单因子污染指数及内梅罗综合多因子指数指示无污染清洁安全等级, THQ/TTHQ 值小于 1 表明暴露风险可控。

矿质元素是构成茶叶干物质的基础之一, 其丰度可调控生化代谢与滋味物质形成, 亦是影响茶叶品质的关键指标之一[31,35–37]。针对酸枣叶茶中矿质元素含量, 前人研究已揭示了其潜在价值。武丽娜等[38]和王僧虎等[39]发现河北邢台地区酸枣叶富含 Ca (10355.2 mg/kg、1310 mg/kg)、Mn (82.2 mg/kg、28.3 mg/kg), 李凤英[40]报道河北昌黎样品以 Fe (245.7 mg/kg)、Zn (46.3 mg/kg)、Mn (60.5 mg/kg)为特征。于雁灵等[41]发现山东烟台地区酸枣叶 Ca (16098 mg/kg), Fe (558.5 mg/kg)、Mn (15.13 mg/kg)含量丰富。本研究得出的“酸枣叶茶富含矿质元素”的结论与上述研究基本一致, 但在具体含量上与文献报道既有重叠也有差异(本研究测得的 Ca、Fe、Mn 含量范围分别为 7565.25~11682.75、128.25~424.97, 24.39~57.49 mg/kg)。这些含量的差异很可能源于产地环境(如土壤母质、肥力状况)、采样部位(嫩叶/老叶)、加工工艺乃至检测方法的不同。综合表明, 不同产区酸枣叶矿质元素谱系丰富, 同时地域性含量差异显著, 且诸多元素间存在显著的正相关或负相关关系。这一现象与传统茶叶中研究结论一致, 不同产地环境下会形

成了独特的“元素指纹”[42]，这也正是建立产地溯源技术的理论基础。

同时，本研究也存在一定局限性。研究中所使用样本量符合初步筛查的常规要求，成功揭示了市售酸枣叶茶的总体安全状况与地域差异趋势。但每个产区的样本数量有限，未来研究可进一步扩大样本量以获取更精确的分布参数。重金属风险评估中 Cr、Cd、Hg、As 的限量因现行国家标准缺乏明确规定，且缺乏相关毒理学数据，参考了已废止的 NY 659—2003 标准，此做法可能导致风险评估存在一定不确定性。同时，本研究中重金属风险评估使用的是原料中的重金属值，结合浸出率可以合理推断，通过茶汤摄入的健康风险将处于更低的水平，但要研究更精确的矿质元素人体摄入量，要进一步研究元素的浸出规律。

4 结 论

酸枣叶代用茶中 K、Ca、Fe 矿质元素含量丰富(占所测 15 种元素的 97.9%)，同时评估陕西秦岭、河北邢台、山东泰安、陕西吕梁、山东沂蒙山、山东日照、山东崂山 7 个主产地的市售酸枣叶茶样品中 6 种重金属(Cr、Cu、Pb、As、Cd、Hg)含量均符合国家标准，污染指数(P_{max}<0.6, $P_{综}$<0.7)与健康风险评估(THQ/TTHQ<1)，综合表明在当前评估模型下，其重金属污染水平低，健康风险处于可接受水平。

参考文献

[1] 闫艳, 付彩, 杜晨晖. 酸枣叶的营养成分、保健功能及产品开发研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(20): 330–336, 342.
YAN Y, FU C, DU CH. Research progress on nutrient composition, health functions and product development of *Ziziphi spinosae* folium [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(20): 330–336, 342.

[2] 庄福金, 许雪平, 于丹, 等. 崂山酸枣芽茶改善小鼠睡眠作用的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(10): 4051–4056.
ZHUANG FJ, XU XP, YU D, *et al*. Study on improvement of sleep in mice by Laoshan sour jujube bud tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(10): 4051–4056.

[3] 赵新华, 伊丽楠. 酸枣叶提取物对中枢神经系统作用的实验研究[J]. 时珍国医国药, 2009, 20(2): 463–464.
ZHAO XH, YI LN. Experimental study on effects of sour jujube leaf extract on central nervous system [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2009, 20(2): 463–464.

[4] TAO Y, FU C, DU H, *et al.* Integrated serum, urine metabolomics and 16S rRNA sequencing to investigate the modulatory effect of *Ziziphi spinosae* folium flavonoid on *D*-galactose-induced aging of rats [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2024, 17(2): 105591

[5] 吴树勋, 张建新, 徐涛, 等. 酸枣(仁、叶、肉)与酸枣皂甙 A 对中枢神经系统作用的实验研究[J]. 中国中药杂志, 1993(11): 685–687, 703–704.
WU SX, ZHANG JX, XU T, *et al*. Experimental study on the effects of *Ziziphus jujuba* (seed, leaf and pulp) and jujuboside A on the central nervous system [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 1993(11): 685–687, 703–704.

[6] 闫艳, 杜晨晖, 冯红霞, 等. 整合 UHPLC-Q Exactive 轨道肼高分辨质谱与 HPLC-CL 技术分析酸枣叶中抗氧化活性成分[J]. 中草药, 2016, 47(17): 3109–3114.
YAN Y, DU CH, FENG HX, *et al*. Analysis on antioxidant constituents in *Ziziphi spinosae* folium by integrating UHPLC-Q exactive orbitrap HRMS and HPLC-CL technology [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2016, 47(17): 3109–3114.

[7] BAI L, CUI X, CHENG N, *et al*. Hepatoprotective standardized EtOH-water extract of the leaves of *Ziziphus jujuba* [J]. Food & Function, 2017, 8(2): 816–822.

[8] DAMIANO S, FORINO M, DE A, *et al*. Antioxidant and antibiofilm activities of secondary metabolites from *Ziziphus jujuba* leaves used for infusion preparation [J]. Food Chemistry, 2017, 230: 24–29.

[9] 153 医院科研组. 酸枣叶片治疗冠心病 85 例疗效观察[J]. 人民军医, 1976(1): 58–59.
153 Hospital Research Group. Observation on the therapeutic effect of sour jujube leaf tablets in 85 cases of coronary heart disease [J]. People’s Military Surgeon, 1976(1): 58–59.

[10] 束靖, 王信宏, 马晓君. 酸枣产业生产现状及发展趋势[J]. 落叶果树, 2023, 55(6): 8–12.
SHU J, WANG XH, MA XJ. Production status and development trend of sour jujube industry [J]. Deciduous Fruits, 2023, 55(6): 8–12.

[11] LIU HX, XU MY, LIU H, *et al*. Iminodisuccinic acid enhances antioxidant and mineral element accumulation in young leaves of *Ziziphus jujube* [J]. Open Chemistry, 2022, 20(1): 401–409.

[12] 张倩, 张菊. 多指标综合评分法优化冠突散囊菌发酵酸枣叶茶工艺[J]. 食品科技, 2024, 49(12): 54–62.
ZHANG Q, ZHANG J. Optimization of the fermentation process of *Eurotium cristatum* for sour jujube leaf tea by multi-index comprehensive scoring method [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(12): 54–62.

[13] JIANG N, HOU S, LIU Y, *et al*. Combined LC-MS-based metabolomics and GC-IMS analysis reveal changes in chemical components and aroma components of *Jujube* leaf tea during processing [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1179553.

[14] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
WAN XC. Tea biochemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.

[15] 张明露, 黄聪薇, 赖飞. 贵州红茶中 14 种微量元素含量分析及健康风险评价[J]. 贵州农业科学, 2023, 51(5): 117–124.
ZHANG ML, HUANG CW, LAI F. Content analysis and health risk assessment of 14 trace elements in Guizhou black tea [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2023, 51(5): 117–124.

[16] 桂安辉, 叶飞, 王胜鹏, 等. 扁形绿茶矿质元素含量与品质成分相关性分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(16): 315–321.

GUI ANH, YE F, WANG SP, *et al*. Correlation analysis between mineral elements content and quality components of flat green tea [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(16): 315–321.

[17] 陈谢勇, 陈静, 任卫威, 等. 不同产地福安大白茶中化学元素特征分析[J]. 核农学报, 2025, 39(7): 1445–1456.
CHEN XY, CHEN J, REN WW, *et al*. Characteristic analysis of chemical elements in Fu'an Dabai tea from different origins [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, 39(7): 1445–1456.

[18] 黄锐敏, 李星, 何肖云, 等. 基于矿物元素指纹图谱技术的武夷岩茶产地溯源研究[J]. 福建农业科技, 2025, 56(6): 17–25.
HUANG RM, LI X, HE XY, *et al*. Geographical traceability of Wuyi rock tea based on mineral element fingerprinting technology [J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2025, 56(6): 17–25.

[19] AHMED R, ISLAM M, SULIEMAN A, *et al*. A study on the heavy metals, nutritional values, and health risks of black and leaf tea available in Kalar City: A preliminary assessment of tea quality and daily intake [J]. Starch-Stärke, 2025, 77(10): e70120.

[20] ZHANG J, YANG R, LI YC, *et al*. Distribution, accumulation, and potential risks of heavy metals in soil and tea leaves from geologically different plantations [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 195: 110475.

[21] 刘文政, 杨绍群, 殷忠, 等. 黔产市售绿茶重金属的含量特征及健康风险评估[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(6): 19–25.
LIU WZ, YANG SQ, YIN Z, *et al*. Content characteristics and health risk assessment of heavy metals in Guizhou commercial green tea [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(6): 19–25.

[22] 何进, 刘琳, 张黎黎, 等. 2016—2021 年贵州省市售食品中铅污染状况及主要膳食中铅暴露的健康风险评价[J]. 现代预防医学, 2023, 50(12): 2153–2157.
HE J, LIU L, ZHANG LL, *et al*. Lead pollution in commercial foods and health risk assessment of lead exposure from main diets in Guizhou Province, 2016—2021 [J]. Modern Preventive Medicine, 2023, 50(12): 2153–2157.

[23] 丁雯, 杜晨晖, 李泽, 等. 药用植物酸枣道地产地及种质资源多样性的研究进展[J]. 世界中医药, 2022, 17(14): 2080–2086, 2091.
DING W, DU CH, LI Z, *et al*. Research progress on genuine producing area and germplasm resource diversity of medicinal plant *Ziziphus jujuba* var. spinose [J]. World Chinese Medicine, 2022, 17(14): 2080–2086, 2091.

[24] 陈璐, 李霞, 李增梅, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定山东小麦中铬、镍、铜、砷、镉、铅、锌的含量[J]. 中国无机分析化学, 2020, 10(3): 66–70.
CHEN L, LI X, LI ZM, *et al*. Determination of Cr, Ni, Cu, As, Cd, Pb and Zn in Shandong wheat by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2020, 10(3): 66–70.

[25] 董照锋, 赵宇, 李俊, 等. 商洛市茶园产地环境及茶叶重金属污染风险评价及修复[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 227–232.
DONG ZF, ZHAO Y, LI J, *et al*. Risk assessment and remediation of heavy metal pollution in tea garden origin environment and tea leaves in Shangluo City [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(3): 227–232.

[26] 丁敏, 陈璐, 万春燕, 等. 鲁西南沿黄县区玉米中铅、镉、砷、铬重金属的含量及健康风险评价[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(1): 57–63.
DING M, CHEN L, WAN CY, *et al*. Contents and health risk assessment of heavy metals Pb, Cd, As and Cr in maize from counties along the Yellow River in southwestern Shandong Province [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(1): 57–63.

[27] 丁钢强, 马爱国. 中国居民膳食指南科学研究报告(2021)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2021.
DING GQ, MA AIG. Scientific research report on dietary guidelines for Chinese residents (2021) [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2021.

[28] US Environmental Protection Agency. Exposure factors handbook [R]. Washington DC: EPA, 2011.

[29] 程加迁, 王俊平. 蔬菜水果重金属膳食暴露评估中风险权重的确定方法[J]. 食品科学, 2018, 39(1): 47–52.
CHENG JQ, WANG JP. A method for determining risk weights in dietary exposure assessment of heavy metals in vegetables and fruits [J]. Food Science, 2018, 39(1): 47–52.

[30] 姜涛, 姚艺新, 刘子祯, 等. 不同产地前胡 27 种无机元素的多元统计分析[J]. 中医药导报, 2020, 26(13): 33–39.
JIANG T, YAO YX, LIU ZZ, *et al*. Multivariate statistical analysis of 27 inorganic elements in *Peucedanum praeruptorum* Dunn from different habitats [J]. Guiding Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2020, 26(13): 33–39.

[31] 宋勤飞, 庄菊花, 李玖美, 等. 不同原料普安红茶矿质元素分析及营养和健康风险评价[J]. 食品科技, 2025, 50(2): 87–95.
SONG QF, ZHUANG JH, LI JM, *et al*. Mineral element analysis and nutritional and health risk assessment of Pu'an black tea from different raw materials [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(2): 87–95.

[32] 宋志东, 唐永金. 常见污染元素土壤背景值间的相关关系[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(9): 322–324.
SONG ZD, TANG YJ. Correlation between soil background values of common polluting elements [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(9): 322–324.

[33] 陈立乔, 魏复盛. 中国土壤 60 种元素共生组合关系的计算机分析[J]. 中国环境监测, 1991(4): 1–5.
CHEN LQ, WEI FS. Computer analysis of symbiotic association of 60 elements in soils of China [J]. Environmental Monitoring in China, 1991(4): 1–5.

[34] 孙尚琛, 王永刚, 何碧红, 等. 转运蛋白在细菌吸附、解毒重金属中的功能预测与分析[J]. 环境污染与防治, 2025, 47(4): 48–53.
SUN SC, WANG YG, HE BH, *et al*. Functional prediction and analysis of

transporter proteins in bacterial adsorption and detoxification of heavy metals [J]. Environmental Pollution & Control, 2025, 47(4): 48–53.

[35] 张奇, 张荧, 晏紫, 等. 不同等级金牡丹乌龙茶品质和矿质元素差异分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 288–295.
ZHANG Q, ZHANG Y, YAN Z, *et al*. Analysis of quality and mineral elements differences in different grades of Jinmudan oolong tea [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 288–295.

[36] 叶江华, 刘德发, 刘国英, 等. 不同等级武夷水仙茶品质和矿质元素差异分析[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(6): 105–112.
YE JH, LIU DF, LIU GY, *et al*. Analysis of quality and mineral elements differences in different grades of Wuyi Shuixian tea [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(6): 105–112.

[37] 蒋勋, 陶会, 宋杰玉, 等. 不同等级普安红茶的成分差异及其品质特征[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(13): 4235–4241.
JIANG X, TAO H, SONG JY, *et al*. Component differences and quality characteristics of different grades of Pu'an black tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(13): 4235–4241.

[38] 武丽娜, 何华容, 武延生, 等. 野生酸枣叶中蛋白质、VC 和矿物质含量的测定[J]. 现代园艺, 2021, 44(3): 40–41.
WU LN, HE HR, WU YS, *et al*. Determination of protein, VC and mineral content in wild sour jujube leaves [J]. Modern Horticulture, 2021, 44(3): 40–41.

[39] 王僧虎, 石晓云. 邢台山区野生酸枣叶成分测定及开发利用[J]. 北方园艺, 2012(17): 39–40.
WANG SH, SHI XY. Component determination and development and utilization of wild sour jujube leaves in Xingtai mountain area [J]. Northern Horticulture, 2012(17): 39–40.

[40] 李凤英. 酸枣叶营养保健茶的研制[C]. 中国科协第 3 届青年学术年会园艺学卫星会议暨中国园艺学会第 2 届青年学术讨论会. 中国江苏南京, 1998: 4.
LI FY. Development of nutritional health tea from sour jujube leaves [C]. The satellite conference of horticulture of the 3rd youth academic annual meeting of china association for science and technology and the 2nd youth academic symposium of Chinese society for horticultural science. Nanjing, China: 1998: 4.

[41] 于雁灵, 汪学昭. 不同消化方法对测定酸枣叶中部分金属元素含量的比较研究[J]. 广东微量元素科学, 2000, 7(1): 3.
YU YL, WANG XZ. Comparative study on determination of some metal elements in sour jujube leaves by different digestion methods [J]. Guangdong Trace Elements Science, 2000, 7(1): 3.

[42] 李彦龙, 钱丽丽, 陈明明, 等. 元素指纹在茶叶产地溯源中的应用及其影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(24): 293–301.
LI YL, QIAN LL, CHEN MM, *et al*. Research progress on the application of element fingerprint in tea geographical origin traceability and its influencing factors [J]. Food Science, 2024, 45(24): 293–301.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)